第40卷 第4期
2023年4月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 4
Apr. 2023

西北地区农业干旱脆弱性评估及时空分布特征

李菲菲[1]， 周 霞[1]， 周玉玺[2]

（1. 山东农业大学经济管理学院，山东 泰安 271018；2. 山东农业大学公共管理学院，山东 泰安 271018）

摘 要： 西北地区是重要农牧交错区，生态环境脆弱，农业生产对气候变化极为敏感，研究其农业干旱脆弱性时空分布特征是有效应对干旱气候的关键。基于IPCC评估框架，考虑蒸散对土壤含水量的影响，将多时间尺度干旱指数纳入指标体系，研究西北地区农业干旱脆弱性及其时空分布特征。结果表明：2010—2020年该地区农业干旱脆弱性呈现下降态势，其中2010—2015年下降幅度最大，但区域均衡性减弱，出现“两极”现象；2015—2020年脆弱重心逐渐向南部地区转移，形成“辐射”效应。该地区农业干旱脆弱性冷热点区域变化显著，2010年热点区域集中在新疆西南部，冷点区域分布在新疆北部和宁夏；2020年热点区域转移至甘肃和青海南部，且呈现向外辐射现象，冷点区域主要集中在新疆北部地区。

关键词： 西北地区；农业干旱脆弱性；IPCC评估框架；熵权法；空间热点探测分析；干旱指数

干旱是影响中国农业生产最为严重的自然灾害之一[1]，常分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱四种类型[2]。西北地区属于典型干旱半干旱地区，也是重要农牧交错区[3]和畜产品生产区，气热资源丰富，具有发展农牧业生产的自然优势，但在地貌和水资源分布多重因素影响下，形成了雨养旱作、半旱作半灌溉等多种农业类型，导致该地区农业生产系统对于干旱极敏感[4-5]；农业经济发展加速，但农牧业与自然资源存在结构性错位，导致水资源供需矛盾、地下水超采、土壤瘠薄、草原退化等问题，使其成为生态环境脆弱区和气候变化敏感区[6-7]。2021年该地区出现不同程度农业干旱，其中宁夏北部、甘肃东北部、陕西北部出现中至重度农业干旱，农业生产受到严重冲击[8]。为促进西北干旱区农牧业可持续发展，2015年国家农业部指出持续改善西北地区生态环境，兼顾增产增收与资源生态永续利用；2020年国家推进西部大开发形成新格局时，强调增强防范化解各类风险能力，促进西部地区经济发展与人口、资源、环境相协调，加强干旱管理尤为重要。短期干旱管理倾向于监测干旱指数，而长期干旱管理关注于评价干旱风险和干旱脆弱性[9]，故研究西北地区农业干旱脆弱性及时空演变是有效应对长期干旱气候的关键。

IPCC（联合国政府间气候变化专门委员会）指出脆弱性内容包括气候变化背景下系统的暴露水平、受气候变化影响的敏感性程度及其对气候变化的适应能力[8]。现有干旱脆弱性的研究对象包括农业[10-11]、农作物[12]；研究内容主要包括干旱脆弱性评估[13-15]，干旱脆弱性时空演变[16-17]以及干旱脆弱性成因机理[18]；指标体系构建角度主要有：一是基于其内涵从水资源、农业经济、社会和防旱抗旱四个角度[10]，另一类是基于IPCC脆弱性评估框架从暴露度、敏感性和适应能力[16]构建指标。现有大多数研究局限在气象干旱[3]，针对于农业干旱研究较少，在灌溉补给作用下气候干旱并不一定导致农业干旱，持续的气候干旱使得土壤水分不足才会导致农业干旱，鲜有将多时间尺度干旱指数纳入指标体系；已有研究忽略了蒸散对土壤含水量的影响，在强蒸发作用下表土水分消耗迅速，近地表—饱水带形成的负压使得地下水向上输送，成为维持土壤水分和作物需水的重要来源[19]。基于此，对生态脆弱的西北地区展开系统研究，以期厘清该地区农业干旱脆弱性时空分布特征及干旱致脆因子，为区域干旱风险规划提供现实依据，对保障生态安全格局具有重

收稿日期： 2022-09-28； **修订日期：** 2022-11-17
基金项目： 国家社科基金项目（21BJY130，19BGJ171）；山东省高等学校青年创新团队发展计划“农村环境治理与政策创新团队”
作者简介： 李菲菲（1996-），女，硕士研究生，主要从事农业资源与环境研究. E-mail: 2839428080@qq.com
通讯作者： 周霞. E-mail: sofia612@sdau.edu.cn

要现实意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

中国西北地区地处欧亚大陆，属于中亚干旱区，气候干燥，干旱缺水，植被稀少，生态环境脆弱，包括陕西、青海、宁夏、新疆和甘肃，占国土总面积的32.11%。该地区是重要农牧交错区和特色优势农产品产区，畜牧业以养殖牛、羊为主，农业以种植瓜果、棉花、水果为主。该地区面临水资源短缺，2020年供水总量仅占全国水资源总量的14.89%；农牧业发展基础薄弱，易受干旱气候影响，综合生产能力严重受损；农牧业存在结构性错位，种植业与畜牧业比例约为7:3，2020年农业用水量占该地区水资源总量的87%，加剧了水资源贫乏程度；农村经济发展相对落后，2020年农民人均纯收入比全国平均水平低25.34%，农户干旱灾害承担能力较弱。

1.2 指标体系构建

基于IPCC脆弱性评估框架，考虑西北地区农业干旱形成机制，在保障数据科学性和可得性前提下，具体指标选取及含义见表1。暴露度是由于变异因素致使该地区农业受到干旱的程度。在扩展水资源概念下，绿水即天然降水被生态系统直接利用部分，该地区气温高蒸散强，绿水作为作物生长需水天然供给源，能够有效缓解气象干旱，故考虑前期降水量、水分供求以及蒸散作用对农业干旱的影响，选取月、季和年多时间尺度干旱指数体现降水利用效率以及气象干旱特征。敏感性是在外界压力下农业可能受到干旱胁迫，水资源主要压力源分为：一是由人口和农牧业组成的农用水压力；二是土地受耕地复种、化学要素投入以及产值带来的投入产出双重压力。适应能力是该地区农业对于干旱灾害预防、承受能力及灾后恢复程度，指标选取从宏观环境与微观主体两个角度，选取区域整体农业生产基础环境指标表征干旱适应能力的基础保障；选取农户生产投入指标表征采取适应性能力的主观能动性；选取粮食单产反映该地区应对干旱生产方式的产出水平。

1.3 研究方法

1.3.1 熵权法　目前赋予指标权重方式主要分为主观赋权（层次分析法、德尔菲法等）和客观赋权（熵权法、TOPSIS法等）两种大类[19]，其中熵权法是依据各指标值的相对变化程度进行赋权，能克服指标间的信息重叠，使指标权重更具有客观性，为多指标综合系统综合评价提供依据。具体公式如下：

$$Z_j = \sum_{j}^{n} \theta_j x_{ij} \tag{1}$$

式中：Z_j 为农业干旱脆弱性指数；θ_j 为指标权重；x_{ij} 为标准化后的指标数据。

表1　西北地区农业干旱脆弱性评价指标体系

Tab. 1　Evaluation index system of agricultural drought vulnerability in Northwest China

要素层	准则层	指标层	指标含义	单位
暴露度(+)	干旱特征	干旱频次	年干旱发生的月份数次数	次
		干旱强度	标准化降水蒸散指数(SPEI)	–
		干旱趋势	干旱指数(PDSI)斜率	–
敏感性(+)	农用水压力	农业人口占比	农业人口/地区总人口	%
		农作物播种面积	–	10^3 hm^2
		大牲畜头数	大牲畜存栏头数	10^4头
	土地压力	耕地复种指数	农作物播种面积/耕地面积	%
		单位播种面积化肥施用量	化肥施用量/农作物播种面积	t·hm^{-2}
		第一产业产值占比	第一产业产值/地区生产总值	%
适应能力(–)	经济水平	人均GDP	地区生产总值/地区总人口	元
		农村居民可支配收入	–	元
	生产水平	农业机械总动力	农业机械总动力	Kw
		粮食单产	粮食总产量/粮食播种面积	kg·hm^{-2}
	水利设施	水利建设投资额	水利建设固定资产投资额	%

注：SPEI干旱指数低于–0.5视为干旱，基于SPEI月度指数得到干旱发生的月数；运用SPEI年度指数，表征干旱强度；表征干旱趋势时，用研究时期前50 a的PDSI拟合曲线斜率表示，例如2020年陕西干旱趋势为1970—2020年陕西PDSI指数拟合曲线的斜率。

1.3.2 农业干旱脆弱性函数 运用ArcGIS 10.1采用自然断点法将暴露度(*EI*)、敏感性(*SI*)、适应能力(*AI*)和农业干旱脆弱性(*DVI*)划分为低度、中度、高度和极度4个等级,由于暴露度和敏感性指数越高将加重农业干旱脆弱性,而适应能力指数提升将减弱农业干旱脆弱性,故农业干旱脆弱性函数设定如下:

$$DVI = EI + SI - AI \tag{2}$$

1.3.3 空间热点探测分析 空间热点探测分析(Getis-Ord G_i^*)是一种识别局部区域是否具有显著热点或冷点集聚的局部空间相关性分析[20],借助ArcGIS软件可视化西北地区农业干旱脆弱性热点区域和冷点区域空间分布,解释其该地区农业干旱脆弱性空间分异特征。公式如下:

$$G_i^*(d) = \sum_{j=1}^{n} W_{ij}(d) X_j / \sum_{j=1}^{n} X_j \tag{3}$$

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{\mathrm{Var}(G_i^*)}} \tag{4}$$

式中:$G_i^*(d)$ 为探测冷热点的统计量;$Z(G_i^*)$、$E(G_i^*)$、$\mathrm{Var}(G_i^*)$ 分别为 G_i^* 统计量的标准化、期望和变异系数;$W_{ij}(d)$ 为空间权重;X_j 为第j个地区农业干旱脆弱性指数。当 $Z(G_i^*)$ 显著为正时,表明i地区为高值集聚的热点区域;反之,则为低值集聚的冷点区域。

1.4 数据来源

将西北地区的51个市、区(州)作为研究对象,其中新疆部分地区因数据获取受限,故未纳入石河子市、阿拉尔市、图木舒克市、五家渠市、北屯市、铁门关市、双河市、可克达拉市、昆玉市和河胡杨河市。研究数据来源:一是气象数据,包括气温、风速、降水等数据,来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA),运用FLDAS数据集10 km分辨率数据进行异常值处理;二是统计数据,包括2011—2021年《中国城市统计年鉴》、各省(区)统计年鉴和水资源公报。

2 结果与分析

2.1 西北地区农业干旱脆弱性要素时空变化特征

2.1.1 暴露度分析 2010—2020年西北地区暴露度水平波动较为频繁,暴露重心从西北转向东南。2010—2015年该地区整体干旱暴露度降低,均值从0.1027降至0.0924,空间格局"西高东低"逐步加强。从不同省份来看,仅新疆干旱暴露度明显增加,其中10个地市(自治州)从中高度暴露升级为极度暴露地区,主要是气候干燥少雨加重了干旱暴露度;其余省份干旱暴露度呈现不同程度的下降,陕陇宁青暴露度均值下降幅度分别为32.97%、13.45%、8.20%、13.86%。2015—2020年该地区整体干旱暴露度增加,均值从0.0924降至0.1241,分布重心从西部逐渐向南部转移,集中在青陇南部。新疆暴露度下降,极度暴露从12个降为2个,并且出现5个低度暴露区域,主要是在研究时期内干旱频率明显下降。其余37个地市中,仅5个区域暴露度等级降低,13个区域暴露度等级不变,51.35%区域暴露度等级呈现不同程度升级,反映出目前气候变暖加重了该地区农业生产环境干旱程度。

2.1.2 敏感性分析 2010—2020年西北地区敏感性水平逐步降低,形成"东西高,中部低"的空间分布格局。2010—2015年该地区整体干旱敏感性均值从0.1422降至0.1407,6个极度敏感地区降为高度敏感地区,3个高度敏感地区降为中度敏感地区,仅17.65%地区敏感程度升级。2015—2020年该地区整体干旱敏感性均值从0.1407降至0.1256,主要处于中度敏感等级。2020年不同省份干旱敏感性从高到低为:陕、宁、新、青、陇,较2015年降幅分别为:7.86%、12.37%、15.47%、5.19%、12.05%。

其中,甘肃和青海中部敏感性始终处于较低水平是受益于城镇化,农业人口占比下降缓解了部分敏感性;新疆东部主要是由于农业人口占比、耕地复种指数和第一产业产值占比过高所致,较强的农业产出依赖性增加了干旱敏感性。该地区整体农作物播种面积较大,一方面是保障粮食安全,另一方面肉蛋奶需求推动大牲畜养殖,饲用粮需求同步增加,从而加重了农业水资源短缺的敏感性。

2.1.3 适应能力分析 2010—2020年西北地区适应能力逐步增强,但区域发展不平衡性加强,高适应地区集中在西部和北部,低适应地区集中在中南部。2010—2015年该地区整体适应能力均值从0.0726提至0.1015,东部10个高度适应地区升为极度适应地区,南部16个低度适应地区降为5个。2015年不同省份干旱适应能力从高到低为:新、陕、宁、陇、青,较2010年提升了41.72%、42.16%、38.22%、43.06%、30.80%,得益于前期"西部大开发"基础建设,农业经济逐步发展,应对干旱的适应能

力增强。2015—2020年该地区整体适应能力均值从0.1015增至0.1192，整体增速逐渐放缓，2020年不同省份干旱适应能力从高到低为：新、宁、陕、陇、青，较2015年增加了7.25%、24.82%、18.37%、10.20%、36.53%。从市域层面分析，仅3个地区实现了适应能力等级提升，71.15%地区保持原有适应能力等级，反映出在可持续发展理念下，如何激励农户开展土地集约生产，投入机械化肥等要素，提高资源利用效率等方面实现自身干旱适应能力提升是未来发展重点。

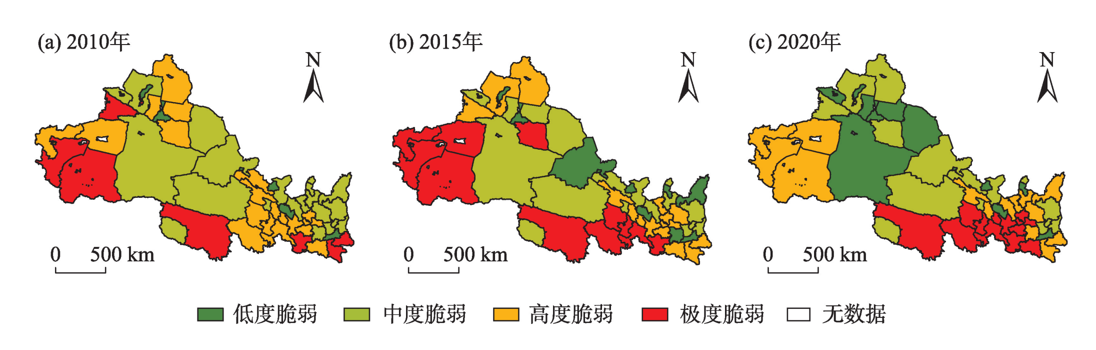
2.2 西北地区农业干旱脆弱性指数时空演变特征

西北地区农业干旱脆弱性呈现下降态势，主要致脆因素集中在干旱频次、耕地复种指数和单位播种面积化肥施用量、第一产业产值占比、农村居民可支配收入、农业机械总投入和粮食单产。从不同要素层面来看，暴露度呈现先增后减，反映出该地区"暖湿"气候趋势下，其干旱趋势减弱，但整体来看干旱频次仍是其主要暴露因子；敏感性始终保持上升趋势，且增幅逐年加快，说明农牧民为保障农产品稳定供给，农作物播种面积逐年增加，物质要素投入加大，加重了土地压力，同时第一产业产值占比提高，反映出该地区农业对于干旱更加敏感；适应能力处于下降状态，研究时期内宏观经济环境逐渐改善，区域人均GDP提高，水利设施逐渐完善，但农村居民可支配收入较低，使得生产过程中要素、机械等投入受资金限制，粮食单产仍具有较大提升空间。

农业干旱脆弱性指数从2010年0.1710减小到2020年0.1238，降低27.60%。由图1可知，2010—2015年农业干旱脆弱性下降幅度最大，中度脆弱地区从20个减至16个，低度脆弱地区从6个增至10个，是其下降幅度较大的原因。但7个地区从高度脆弱升级为极度脆弱地区，反映出该地区干旱脆弱性区域均衡性减弱，出现"两极"现象。2015—2020年该地区农业干旱脆弱性持续下降，主要是在2016—2020年《西北旱区农牧业可持续发展规划》落实中，农业综合生产能力大幅提升，表现为产出提高和抗旱能力增强。该阶段干旱脆弱地区从新疆西部、甘肃南部和青海南部逐渐向南部地区转移，青海和甘肃南部的高脆弱区域附近地区脆弱等级出现不同程度升级现象，形成"辐射"效应，一是由于以灌溉农业为主，农牧结构较为不合理带来水资源需求过大，而在水资源约束下加重了脆弱程度；二是农业发展较为落后，气象变异性增加了干旱发生概率使农业稳定供给和农户增加收入面临巨大挑战，再次增加了地区农业干旱脆弱性。如何资源集约循环利用与防灾减灾救灾体系完善，提高内部资源生产力，实现农民增收带动干旱适应能力提升，是应对气候变化的有效措施。

2.3 西北地区农业干旱脆弱性指数冷热点空间演变特征

由图2a可知，2010年西北地区干旱脆弱性冷热点区域较少，次热区域分布在新疆西南部（克孜勒苏柯尔克孜自治州、喀什地区和和田地区），原因是农户经济水平较低，在落后生产条件下农户只能通过提高种植规模增加产出，而干旱强度大且持续时间长，农作物极易受到干旱灾害影响，再次加重了该区域干旱脆弱性。次冷区域包括新疆北部5个区域和宁夏2个区域（银川市、中卫市），该区域普遍经济发展较好，农村居民可支配收入水平提高，抵抗干旱风险能力增强，同时农业人口占比较少，农业现代化水平高，生产效率与水资源利用效率双重提



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2019)1822号，对底图边界无修改。下同。

图1 西北地区农业干旱脆弱性指数空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of agricultural drought vulnerability index in Northwest China

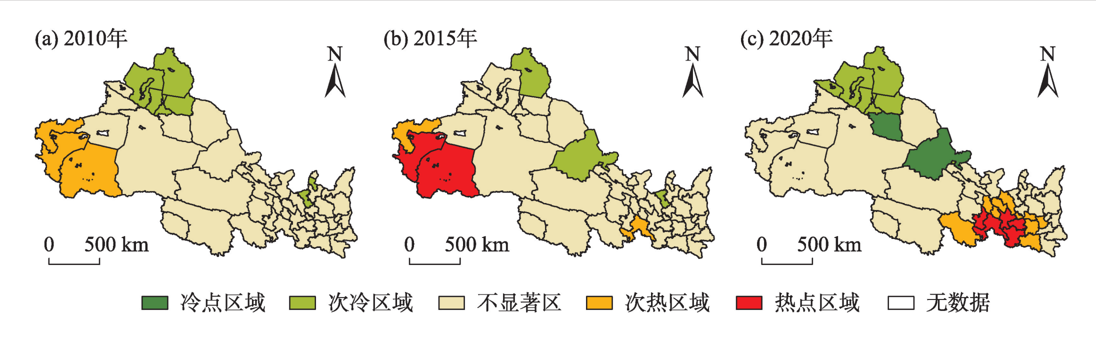


图2　西北地区农业干旱脆弱性指数冷热点空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of cold and hot spots of agricultural drought vulnerability index in Northwest China

升，有效降低了干旱脆弱性。

由图2b可知，2015年农业干旱脆弱性热点区域仍集中在新疆西南部（喀什地区和和田地区），但冷点区域呈现碎片化特征。新疆2个次热区域升级为热点区域，另外次热区域新增了甘南藏族自治州，原因是由于当地经济发展较为落后，农业机械动力投入不足，且农业生产受干旱灾害影响严重，粮食单产水平处于甘肃最低水平，从而加重了其干旱脆弱性。次冷区域数量包括阿勒泰地区、酒泉市和中卫市，较2010年数量显著降低，且分布最为分散，主要是“十二五”期间西部大开发改善农业生产基础设施，重点解决区域工程性缺水问题，减弱了农业对水资源依赖程度，但由于资源配置和农业生产匹配程度具有区域差异性，使得低脆弱区域呈现分散化格局。

由图2c可知，2020年农业干旱脆弱性热点区域转移到甘肃和青海南部，且呈现出以天水市、定西市、陇南市、甘南藏族自治州和黄南藏族自治州为核心，向宝鸡市、咸阳市、汉中市、兰州市、白银市、平凉市、临夏回族自治州、西宁市和果洛藏族自治州辐射，主要是该类区域资源性缺水严重，人口密集度增加，经济发展落后，土地荷载高是导致高脆弱集聚的关键。冷点区域分布在北部，包括新疆北部7个区域和甘肃酒泉市，一是通过不断优化种植结构，充分发挥自然资源优势，二是基本实现主要农作物机械化和集约化生产提升了资源利用效率，从而实现了敏感性降低和适应能力提高的双赢局面。

3　讨 论

西北地区是典型干旱半干旱地区，但在地貌多样和水资源分布不均双重因素影响下，形成了雨养旱作、半旱作半灌溉等多种农业类型，导致该地区农业生产系统对于干旱干扰极端敏感。本文聚焦于农业干旱，基于该地农业经济发展面临的生态环境脆弱、农民返贫风险、自然气象干旱等多种扰动风险，从暴露度、敏感性和适应能力三层面测度农业干旱脆弱性，其中在指标选取上选择多尺度标准化降水蒸发SPEI指数和能够反映前期降水量和水分供求对后期影响的PDSI指数表征干旱特征。区别于已有研究[15,21]，研究发现：（1）2010—2020年西北地区农业干旱脆弱重心呈现西部向南部转移趋势，农业干旱脆弱性指数为：陕<新<宁<陇<青，与王莺等[15]研究北方地区农业干旱脆弱性顺序为：陕<宁<青<新<陇存在差异，可能原因为该研究以省域为研究对象，忽略了新疆和青海等省份其地市之间的显著差异，另外指标构建中仅纳入年降水量，忽略了气象干旱以及蒸散作用对农业生产的影响；（2）识别农业干旱脆弱性的关键致脆因子集中在干旱频次、耕地复种指数和单产，这与马贝等[21]研究西北地区农业生态系统脆弱性主要障碍因子表现为：地形、降水、地表植被、农业灾害、水资源及土地荒漠化有所区别，本研究主要围绕农业干旱脆弱性从自然干旱特征、农业生产投入以及农户抗风险能力方面选取指标，是导致障碍因子存在差异的原因。

4　结论与建议

（1）2010—2020年西北地区农业干旱脆弱性呈现下降态势。从不同要素来看，暴露度波动较为频繁，重心从西北转向东南；敏感性逐步降低，形成“东西高，中部低”分布格局；适应能力逐步增强，但

区域发展不平衡性加强，高度适应区域集中在新疆中部，低度适应区域主要位于青海南部。

（2）从不同阶段来看，2010—2015年农业干旱脆弱性下降幅度最大，但区域均衡性减弱，出现“两极”现象；2015—2020年干旱脆弱重心从新疆西部、甘肃南部和青海南部逐渐向南部地区转移，高脆弱区域附近地区脆弱等级出现不同程度升级现象，形成“辐射”效应。

（3）研究区域干旱脆弱性冷热点区域变化显著，2010年热点区域集中在新疆西南部，冷点区域分布在新疆北部和宁夏；2015年热点区域基本稳定，但冷点区域呈现碎片化特征；2020年热点区域转移到甘肃和青海南部，且呈现向外辐射现象，而冷点区域主要集中在新疆北部。

基于以上结论，建议如下：在干旱气象识别方面，加强气象站点数据分析，及时向农户传达周、月等短期气象预测，作为其开展农业生产的参考信息。在农业生产过程中调整农牧业生产结构，加强抗旱品种作物种植是减弱农业气象干旱约束的有效措施；加强农业机械投入，降低劳动力投入，提高生产效率；完善防灾减灾救灾体系，降低干旱对农业产出水平的影响，有利于守住区域粮食安全与不规模性返贫底线。对水资源开发和管理采取因地制宜模式，在甘肃农业经济较为落后的省份以“供方”视角为主，受经济发展限制，前期水利设施需投入大量资金，但对降低农业干旱风险具有长期效应。而针对新疆等农业基础设施较为完善的地区转向“需方”视角，通过激发农户节水意识，推进节水技术采纳，增加单位水资源产出。

参考文献(References)：

[1] Wu J, He B, Lü A, et al. Quantitative assessment and spatial characteristics analysis of agricultural drought vulnerability in China [J]. Natural Hazards, 2011, 56: 785-801.

[2] Wilhite D A, Glantz M. Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions[J]. Water International, 1985, 10(3): 111-120.

[3] 李梦娜, 钱会, 乔亮. 关中地区农业干旱脆弱性评价[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 166-174. [Li Mengna, Qian Hui, Qiao Liang. Evalution of agricultural vulnerability to drought in Guanzhong area[J]. Resource Science, 2016, 38(1): 166-174.]

[4] Sahana V, Arpita Mondal, Parvathi Sreekumar. Drought vulnerability and risk assessment in India: Sensitivity analysis and comparison of aggregation techniques[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 299: 113689.

[5] 鲁钰, 赵银娣, 董霁红. 西北地区三维生态足迹生态安全评价及驱动力分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1354-1367. [Lu Yu, Zhao Yindi, Dong Jihong. Ecological security evaluation and driving force analysis of three-dimensional ecological footprint in Northwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1354-1367.]

[6] 陈臻琦, 张靖, 张贻龙, 等. 基于VSD的近20 a来浑善达克沙地生态脆弱性变化研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1464-1473. [Chen Zhenqi, Zhang Jing, Zhang Yilong, et al. Spatio-temporal patterns variation of ecological vulnerability in Otindag Sandy Land based on a yulnerablity scoping diagram[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1464-1473.]

[7] 阮永健, 吴秀芹. 基于GRACE和GLDAS的西北干旱区地下水资源量可持续性评价[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3):787-800. [Ruan Yongjian, Wu Xiuqin. Evaluation of groundwater resource sustainablity based on GRACE and GLDAS in arid region of Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 788-800.]

[8] 何亮, 刘维, 张艳红, 等. 2021年夏季气象条件对农业生产的影响[J]. 中国农业气象, 2021, 42(11): 975-978. [He Liang, Liu Wei, Zhang Yanhong, et al. Effects of meteorological conditions on agricultural production in summer 2021[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(11): 975-978.]

[9] Zhang Linlin, Gao Jiangbo, Tang Ze, et al. Quantifying the ecosystem vulnerability to drought based on data integration and processes coupling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 301-302: 108354.

[10] 胡颖颖, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 等. 新疆2001—2010年农业气候干旱脆弱性分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 254-259. [Hu Yingying, Umut Halik, Tayierjiang Aishan, et al. Vulnerability to drought on agriculture in Xinjiang during 2001-2010[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1): 254-259.]

[11] 康永辉, 解建仓, 黄伟军, 等. 农业干旱脆弱性模糊综合评价[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(2): 113-120. [Kang Yonghui, Xie Jiancang, Huang Weijun, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of agricultural drought vulnerability[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014, 12(2): 113-120.]

[12] 武洪涛, 郭佳伟, 郑朋涛. 河南省冬小麦产量的干旱脆弱性研究[J]. 地域研究与开发, 2018, 37(5): 170-175. [Wu Hongtao, Guo Jiawei, Zheng Pengtao. Drought vulnerablity of winter wheat in Henan Province[J]. Areal Research and Development, 2018, 37(5): 170-175.]

[13] 侯光良, 肖景义, 李生梅. 基于气候变化的干旱脆弱性评价——以青海东部为例[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 163-168. [Hou Guangliang, Xiao Jingyi, Li Shengmei. Vulnerabiity assessment of drought based on climate change: A case study of Eastern Qinghai Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(2): 163-168.]

[14] 曹永强, 马静, 李香云, 等. 投影寻踪技术在大连市农业干旱脆弱性评价中的应用[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1106-1110. [Cao

Yongqiang, Ma Jing, Li Xiangyun, et al. Application of the projection pursuit technique in assessment of agricultural drought vulnerability in Dalian[J]. Resources Science, 2011, 33(6): 1106-1110.]

[15] 王莺, 赵文, 张强. 中国北方地区农业干旱脆弱性评价[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 149-158. [Wang Ying, Zhao Wen, Zhang Qiang. Evaluation of agricultural drought vulnerability in Northern China[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(4): 149-158.]

[16] 石育中, 李文龙, 鲁大铭, 等. 基于乡镇尺度的黄土高原干旱脆弱性时空演变分析——以榆中县为例[J]. 资源科学, 2017, 39(11): 2130-2140. [Shi Yuzhong, Li Wenlong, Lu Daming, et al. Spatio-temporal analysis of drought vulnerability on the Loess Plateau of China at town level[J]. Resources Science, 2017, 39(11): 2130-2140.]

[17] 李文龙, 石育中, 鲁大铭, 等. 北方农牧交错带干旱脆弱性时空格局演变[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1599-1612. [Li Wenlong, Shi Yuzhong, Lu Daming, et al. The spatio-temporal of drought vulnerability in the econtone between agriculture and animal husbandry in the North of China[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1599-1612.]

[18] 康永辉, 解建仓, 黄伟军, 等. 广西大石山区农业干旱成因分析及脆弱性评价[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(3): 24-32. [Kang Yonghui, Xie Jiancang, Huang Weijun, et al. Analysis of agricultural drought causes and assessment of its vulnerability in the Dashi mountainous area of Guangxi[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(3): 24-32.]

[19] 辛岭, 安晓宁. 我国农业高质量发展评价体系构建与测度分析[J]. 经济纵横, 2019(5): 109-118. [Xin Ling, An Xiaoning. Construction and empirical analysis of agricultural high-quality development evaluation system in China[J]. Economic Review Journal, 2019(5): 109-118.]

[20] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geographical Analysis, 1992, 24: 189-206.

[21] 马贝, 徐晗筱, 高强. 农业生态系统脆弱性评估：基于西北五省区的实证[J]. 统计与决策, 2020, 36(21): 82-86. [Ma Bei, Xu Hanxiao, Gao Qiang. Agro-ecosystem vulnerability assessment: an empirical study of five provinces in Northwest China[J]. Statistics & Decision, 2020, 36(21): 82-86.]

Vulnerability assessment and spatiotemporal distribution of agricultural drought in Northwest China

LI Feifei[1], ZHOU Xia[1], ZHOU Yuxi[2]

(1. College of Economics and Management, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China;
2. School of Public Administration, Shandong Agricultural University,
Tai'an 271018, Shandong, China)

Abstract: Northwest China is an important agro-pastoral interleaved region, with a fragile ecology and agricultural production that is extremely sensitive to climate change. Studying the spatiotemporal distribution of agricultural drought vulnerability is key to effectively coping with drought. Based on the IPCC vulnerability assessment framework, considering the impact of evapotranspiration on soil water content, a multi-timescale drought index was incorporated into the index system, and the entropy weight method was used to measure the vulnerability of agriculture to drought; the spatiotemporal distribution of agricultural drought vulnerability and the evolution of cold and hot spot areas were also analyzed. The results show that the vulnerability of agriculture to drought in the northwest region showed a downward trend from 2010 to 2020, with the largest decline in 2010 to 2015, but the regional equilibrium was weakened and there was a "polar" phenomenon. The cold and hot spots of drought vulnerability in the northwest region changed significantly. In 2010, the hot spots were concentrated in the southwest of Xinjiang, and the cold spots were distributed in the north of Xinjiang and Ningxia. In 2020, the hot spot area shifted to the south of Gansu and Qinghai, and showed an outward radiation phenomenon, while the cold spot area was mainly concentrated in northern Xinjiang.

Keywords: Northwest China; agricultural drought vulnerability; IPCC assessment framework; entropy weight method; analysis of space hot spot detection; drought index